Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University 40:3 (2025) 1401-1416



Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi Journal of The Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University

Elektronik / Online ISSN: 1304 - 4915 Basılı / Printed ISSN: 1300 - 1884

An experimental analysis on damage tolerance of composite sandwich structures

Erdinç Kurşun¹*^(D), Faruk Elaldı²^(D)

¹Turkish Aerospace, 06980, Ankara, Türkiye

²Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Başkent University, 06790, Ankara, Türkiye

Highlights:

Alternative core

Graphical/Tabular Abstract

materialsDamage detection with machine learning

Lightweight and durable designs

Keywords:

- · Low velocity impact
- PVC foam
- **PET**
- Ultrasonic Inspection
- Damage Tolerance
- Penetration Depth

Article Info:

Research Article Received: 23.11.2022 Accepted: 12.12.2024

DOI:

10.17341/gazimmfd.1209217

Correspondence:

Author: Erdinç Kurşun e-mail: kursunerdinc38@gmail.com phone: +90 553 241 1947



The main objective of the study is to experimentally investigate the effects of different core material and

shell thickness on the impact behavior of sandwich composite plates subjected to low velocity impact. Using

Figure A, when configurations A and B are analyzed in terms of the core material used, it is found that the



Purpose: To investigate the effect of surface plate thickness and core material type on the low-speed impact performance of sandwich composites.

Theory and Methods: This study presents an experimental investigation on the impact response of sandwich composite panels with two different core materials and surface layer thicknesses. Epoxy liquid adhesive was used to provide a strong bond strength between the core and the bottom-top surface layer. Cold press method was used in sandwich composite production. The sandwich panel was water jet cut in accordance with ASTM D7136 standard. A series of low-velocity impact tests were performed using drop weight impact test method. The impact responses of the sandwich composites were obtained using Force - Time curves and Energy - Time curves. Depth of penetration values were determined using Displacement - Time curves. Failure modes in the surface layers were determined by ultrasonic inspection.

Results: In terms of damage tolerance, when sandwich composites with A and B configurations are evaluated, it is determined that sandwich composites with A configuration have higher impact energy absorption and perforation threshold compared to sandwich composites with B configuration. The results of these studies show that increasing the thickness of the surface plate has a direct effect on the depth of penetration, thus increasing the impact resistance of a given sandwich structure. On the other hand, the use of core material with higher fracture toughness is generally found to significantly increase the impact resistance. The effect of using different core materials on the maximum contact force values is more pronounced compared to different surface plate thickness values.

Conclusion: The core material nominal density value and the sandwich composite impact strength value are positively correlated, while the surface plate thickness has no significant effect on the impact strength compared to the core material nominal density.

Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University 40:3 (2025) 1401-1416 Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi Elektronik / Online ISSN: 1304 - 4915 Basılı / Printed ISSN: 1300 - 1884 Journal of The Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University

Kompozit sandviç yapılarda deneysel hasar tolerans analizi

Erdinç Kurşun¹*^(D), Faruk Elaldı²^(D)

¹Türk Havacılık ve Uzay Sanayii, 06980, Ankara, Türkiye
 ²Başkent Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 06790, Ankara, Türkiye

ÖNEÇIKANLAR

- Alternatif çekirdek malzemeler
- Makine öğrenimi ile hasar tespiti
- Hafif ve dayanıklı tasarımlar

Makale Bilgileri	ÖZ
Araştırma Makalesi	Sandviç kompozit yapılar düşük hızlı darbe hasarına karşı son derece hassastır ve darbe sırasında yükleme
Geliş: 23.11.2022	ve hasar süreçlerinin detaylı bir şekilde karakterize edilmesi büyük bir önem arz etmektedir. Bu çalışmanın
Kabul: 12.12.2024	amacı, farklı kabuk kalınlığı (dokuma karbon/epoksi) ve PVC köpük – PET çekirdekten oluşan sandviç panellerin düsük hızlı darbe davranısını denevsel olarak incelemektir. Kabuklar, 2 farklı kalınlıkta ve 00/900
DOI:	simetrik oryantasyonunda üretilmiştir. 4 farklı yapıda sandviç kompozit üretilmiştir. Sandviç kompozit
10.17341/gazimmfd.1209217	üretiminde soğuk pres metodu kullanılmıştır. Düşük hızlı darbe testleri Başkent Üniversitesi Malzeme ve
5	Üretim laboratuvarında bulunan ağırlık düşürme darbe cihazı kullanılarak yapılmıştır. Deney sonuçları ve
Anahtar Kelimeler:	ultrasonik muayene (C Tarama) sonuçları çalışmada belirtilmiştir. Deney sonuçları, çekirdek olarak PET
Düşük hızlı darbe,	malzeme kullanılan yapıların (A-1 ve A-2) darbe yüküne en dayanıklı seçenek olduğunu göstermektedir.
PVC köpük, PET,	Penetrasyon derinliği değerleri kullanılarak, B-1 ve B-2 yapılarındaki tüm numunelerin ful perforasyona
Ultrasonik Muayene,	maruz kaldığı belirlenmiştir. Sandviç kompozit darbe dayanımı değeriyle çekirdek malzeme nominal
Hasar Toleransı,	yoğunluk değerinin pozitif bir ilişki içerisinde olduğu tespit edilmiştir. Kabuk kalınlığı değerinin ise çekirdek
Penetrasyon Derinliği	malzeme nominal yoğunluğuna oranla darbe dayanımına anlamlı bir etkisinin olmadığı belirlenmiştir.

An experimental analysis on damage tolerance of composite sandwich structures

HIGHLIGHTS

- Alternative core materials
- Damage detection with machine learning
- Lightweight and durable designs ٠

Article Info	ABSTRACT
Research Article Received: 23.11.2022 Accepted: 12.12.2024	Sandwich composite structures are highly susceptible to low velocity impact damage and it is of great importance to characterize in detail the loading and damage processes during impact. The aim of this study is to experimentally investigate the low velocity impact behavior of sandwich panels with different shell
DOI:	thickness (woven carbon/epoxy) and PVC foam - PET core. The shells were produced with 2 different thicknesses and crossply (00/900) symmetric orientation. 4 different structures of sandwich composites were
10.17341/gazimmfd.1209217	produced. Cold press method was used in sandwich composite production. Low velocity impact tests were carried out using the weight reduction impact device in Başkent University Materials and Manufacturing
Keywords:	Laboratory. Test results and ultrasonic inspection (C Scan) results are reported in the study. The test results
Low velocity impact, PVC foam, PET, Ultrasonic Inspection, Damage Tolerance, Penetration Depth	show that the structures using PET material as the core (A-1 and A-2) are the most resistant to impact load. Using the penetration depth values, it was determined that all specimens in structures B-1 and B-2 were subjected to full perforation. The core material nominal density value was found to have a positive relationship with the sandwich composite impact strength value. It was determined that the shell thickness value did not have a significant effect on the impact strength compared to the nominal density of the core material.

^{*}Sorumlu Yazar/Yazarlar / *Corresponding Author/Authors : *kursunerdinc38@gmail.com, elaldi@baskent.edu.tr / Tel: +90 553 241 1947

1. Giriş (Introduction)

Sandviç kompozit yapılar, yüksek eğilme sertliği, düşük ağırlık ve geniş bir malzeme yelpazesinden seçim esnekliği gibi birçok avantaj sunmaktadır. Bu tarz yapılar tipik olarak alt-üst yüzey plakalarından ve bir çekirdek malzemeden oluşmaktadır. Yüzey plakaların temel görevi, enine yükü veya eğilme momentini taşımaktır. Kabuğun ayrılması ve sabitlenmesi, enine kesme yükünün taşınması ve diğer yapısal veya işlevsel durumların sağlanması çekirdek tarafından gerçekleştirilmektedir [1]. Sandviç kompozitler, enine yükleri taşımadaki üstün yapısal kapasitelerine ve üstün eğilme rijitliklerine rağmen, hizmet ömürleri boyunca alet düşmesi, dolu ve kuş çarpması sonucu meydana gelen hasarlara karşı oldukça hassastırlar [2]. Darbe yüklerinden kaynaklanan küçük bir yüzey hasarı bir süre sonra üst yüzey plakasının altındaki matris ve elyaf yapıları etkileyip, iç hasara neden olabileceği için son derece önemlidir. Bu nedenle sandviç kompozit yapıların, darbe tipi arızaya karşı hasar toleransının araştırılması elzemdir [3].

Düşük hızlı darbe yüklemesine maruz kalan kompozit plakaların yapılarda çeşitli hasar modları görülmektedir. Matris hasarı, kırılma hatası ve delaminasyonların geliştiği ve birbirleriyle etkileşime girdiği bildirilmektedir. Bu hasarlar, darbe almış bir yapının mukavemetini önemli ölçüde azaltabilmektedir. Düşük hızlı darbelere maruz kalan kompozit malzemeler sorunu literatürde kapsamlı bir şekilde ele alınmıştır. Bu konuva ilişkin kapşamlı incelemeler Abrate [4-6], Richardson ve Wisheart [7] ile Davies ve Olsson [8] tarafından yayınlanmıştır. Genel olarak düşük hızlı darbe hasarının, darbe veri yakınındaki konsantre temas kuvvetleri, kompozit plaka içindeki kayma gerilmeleri ve yapının küresel bükülmesi nedeniyle alt katmanlardaki membran gerilmelerinin etkileşiminden kaynaklandığı kabul edilmektedir. Tipik darbe hasarı Şekil 1'de şematik olarak gösterilmiştir. Ortaya çıkan hasar malzemenin içinde veya darbenin arka yüzünde olabileceğinden, hasarı görsel inceleme ile tespit etmek her zaman mümkün olmamaktadır.

Ticari uçaklarda, dinamik enine yükleme koşulları büyük olasılıkla kuşlarla veya dolu taşlarıyla gece çarpışmalarından, motor kanadı kaybından, pist enkazından veya alet düşmelerinden kaynaklanmaktadır [10]. Darbe koşullarına bağlı olarak, yapısal tepki, herhangi bir malzeme hasarı olmaksızın elastik darbeler arasında yapının ölümcül bir şekilde hasar görmesine kadar değişebilmektedir [7, 10]. Kompozit malzemeler, düşük enine mukavemetleri nedeniyle, darbe yüklemesine maruz kaldıklarında önemli hasarlar geliştirmeye eğilimlidirler. Bir yapının etkilendiği hıza bağlı olarak, darbe tepkisi önemli ölçüde farklılaşabilir ve tamamen farklı hasar davranışlarına neden olabilir. Düşük hızlı darbeler altında yapı, çarpan cismin yükü altında deforme olur ve ortaya çıkan hasar çarpma yerinin etrafında geniş bir alana yayılabilirken, yüksek hızlı darbeler tipik olarak temas noktasının yakınında sınırlandırılmış hasara neden olmaktadır [7]. Hangi hız aralığındaki darbelerin 'düşük hızlı' darbe olarak sınıflandırılacağı literatürde net değildir. Bazı kaynaklar, etkilenen yapıdan bağımsız olarak maksimum bir çarpma hızı belirtmiştir. Abrate [4] düşük hızı 100 m/s'ye kadar olan darbe hızı olarak belirtirken, Cantwell ve Morton [11] çizgiyi 10 m/s gibi oldukça düşük bir seviyede çizmiştir. Bu sabit hız değerlerinin aksine, ortaya çıkan hasara dayalı bir sınıflandırma, Liu ve Malvern [12] ile Joshi ve Sun [13] tarafından önerilmiştir. Önerilen sınıflandırmaya göre, delaminasyon ve matris hasarı düşük hızlı darbelerden kaynaklanırken, penetrasyon hasarı ise yüksek hızlı darbelerden kaynaklanmaktadır. Bunun aksine I.H. Choi, enerji aynı olduğu sürece yüksek hızlı ve düşük hızlı darbe tepkisinin çok benzer olduğunu bildirmiştir [14]. Diğer bir sınıflandırma ise darbeye maruz kalan plakanın yapısal tepkisine dayanmaktadır. Dolayısıyla, düşük hızlı çarpma hızları, çarpma tertibatı ile hedef arasındaki temas süresinin, yapının çarpma tertibatı ile aynı fazda deforme olması için yeterince uzun olduğu çarpma hızlarıdır (Şekil 2'de gösterilmiştir). Bunun aksine, malzeme hasarının bölgesel olduğu ve esas olarak kalınlık boyunca gerilme dalgalarından kaynaklandığı yüksek hızlı veya balistik darbeler söz konusudur. Davies ve Robinson düşük hızları, kalınlık yönünde gerilme dalgası yayılımının hasar sürecinde önemli bir rol oynamadığı çarpma hızları olarak tanımlamıştır [15].

Sandviç yapıların çarpma olaylarının doğasını anlamak için literatürde bir dizi deneysel ve analitik çalışma yapılmıştır [17-20]. Bu çalışmalar arasında, Atas ve Sevim, polivinil klorür (PVC) köpük ve balsa ağacı çekirdekli sandviç kompozitlerin darbe tepkisini araştırmıştır [20]. Yük-sapma eğrileri ve enerji profil diyagramları oluşturulmuş ve hasarlı numuneler farklı çekirdek malzemeleri için incelenmiş ve karşılaştırılmıştır. Anderson ve Madenci, köpük ve bal peteği çekirdekli sandviç panellerin imalatı, düşük hızlı darbe testi ve muayenesinden oluşan bir çalışma gerçekleştirmiştir [21]. Hasar oluşturmak için gereken enerji miktarının yüksek yoğunluklu köpük çekirdekte ve daha kalın yüzey plakasında arttığını bulmuşlardır. Düşük yoğunluklu polimerik köpüklere dayalı 11 farklı sandviç panelin düşük hızlı darbe davranışı Hazizan ve Cantwell tarafından incelenmiştir [22]. Kırılgan çekirdek malzemelerine dayanan PVC/poliüretan (PUR) sistemlerinde hasar tipi kesme kırılması olarak bulunurken, daha yüksek modüllü PVC/PUR sistemlerinde ilk hasar üst yüzey kaplamasında delaminasyon olarak bulunmuştur.



Şekil 1. Düşük hızlı darbe hasarının şematik gösterimi (Schematic representation of low velocity impact Damage) [9]



Şekil 2. Yüksek ve düşük darbe hızı altında darbe tepkisinin şematik gösterimi

(Schematic representation of impact response under high and low impact velocity) [16]

Bir başka çalışmada, Daniel vd. tek yönlü ve kumaş karbon/epoksi ve cam kumaş/vinylester laminatları dört tip PVC köpük ve balsa ahşabı ile incelemişlerdir [23]. PVC köpük çekirdekli sandviç kirişlerin farklı çekirdek malzemelerine sahip kirişlerden daha stabil olduğu sonucuna varmışlardır. Ayrıca, panelin çarpma tertibatı temas ettikten sonraki tepkisini yakalamak için bir sonlu eleman modeli kullanmışlardır.

Çekirdek malzemesi, sandviç yapıların hem statik hem de dinamik davranışlarında önemli bir rol oynamaktadır. Araştırmacılar, tasarımlarında en kullanışlı çekirdek malzemesini göz önünde bulundurmalı ve belirlemelidir. Son yıllarda, PVC köpükler de dâhil olmak üzere polimerik köpük çekirdekler, özellikle deniz ve havacılık ortamlarında, düşük maliyetleri ve yüksek kimyasal yanıcılık dirençleri sebebiyle sıklıkla kullanılmaktadır.

Bu çalışmada, PVC köpük - PET çekirdeklerden ve karbon fiber takviyeli yüzey tabakalardan oluşan sandviç kompozit panellerin düşük hızlı darbe tepkisi incelenmiştir. 1 ve 2 mm kalınlıklarda üretilen karbon fiber takviyeli kompozit yüzey tabakalarının kalınlık etkisi ile araya, bilindik bal peteği yapısı hariç sandviç edilen çekirdek malzemenin düşük hızlı çarpmalara karşı hasar toleransı (enerji emilim yeteneği) deneysel olarak araştırılmıştır. Sandviç kompozit paneller, 10 mm kalınlığında PVC köpük ve PET çekirdek kullanılarak dört farklı yapıda ve 30 cm x 30 cm ebatlarında üretilmiştir. Farklı konfigürasyonların darbe tepkileri kuvvet - zaman eğrileri ve enerji - zaman eğrileri aracılığıyla elde edilmistir. Yer Değiştirme - Zaman eğrileri aracılığıyla penetrasyon derinliği değerleri elde edilmiştir. Bunun yanı sıra, üst ve alt yüz tabakalarındaki hata türleri ultrasonik muayene ile belirlenmiştir. Düşük hızlı darbe yöntemi yeni olmamasına rağmen, sandviç kompozitlerin darbe tepkisi üzerine literatürde geleneksel lamine kompozitlere kıyasla daha az çalışma mevcuttur.

2. Deneysel Çalışmalar (Experimental Study)

2.1. Malzemeler (Materials)

Kabuk malzemesi olarak kullanılan karbon prepreg, SPM Kompozit firmasının VTP H 300 FCA 310 12KUD RC40 HS kodlu ürünüdür. Alt ve üst kabuk malzemeleri, 1 ve 2 mm kalınlığında Acme Kompozit firmasından satın alınmıştır. Kabuklardan 1 mm kalınlığında olanlar; $[0/90]_s$ dizilimine sahiptir. Kabuklardan 2 mm kalınlığında olanlar; $[0/90]_{2s}$ dizilimine sahiptir. Matris malzemesi olarak ağırlıkça, 100 gr epoksi reçine – 38 gr sertleştirici oranında ARALDITE LY 5052 epoksi reçine ve ARADUR 5052 sertleştirici kullanılmıştır (Huntsman Corporation). Epoksi reçine ve sertleştiricinin tipik özellikleri sırasıyla Tablo 1 ve Tablo 2'de verilmiştir.

	25 °C'deki	25 °C'deki	Epoksit
	Viskozitesi	Yoğunluk	İndeksi
	(mPa.s)	(g/cm^3)	(Eq/kg)
Araldite LY	1000 - 1500	1.17	6.65 - 6.85

Tablo 2. Sertleştiricinin özellikleri (Properties of the hardener)

	25 °C'deki Viskozitesi (mPa.s)	25 °C'deki Yoğunluk (g/cm ³)	Amin Değeri (Eq/kg)
ARADUR 5052	40 - 60	0.94	9.55 - 9.75

Çekirdek malzemesi olarak PVC köpük AIREX firmasından (C.70.48), PET Zell-Metall GesmbH Engineering Plastics (Zellamid 1400) firmasından 10 mm kalınlığında temin edilmiştir. Çekirdek malzemesi mekanik özellikleri Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. Çekirdek malzeme mekanik özellikleri (Core material mechanical properties)

Çekirdek Malzeme	Nominal Yoğunluk (kg/m ³)	Çekme Dayanımı (N/mm ²)	Elastisite Modülü (N/mm ²)
PVC Köpük PFT	48 1360	0.95 80	35 3 20
1 5 1	1300	00	5.20

2.2. Numunelerin Üretimi (Production of Samples)

4 farklı yapıda sandviç kompozit üretimi gerçekleştirilmiştir. 4 farklı yapı; 2 farklı çekirdek malzeme ve 2 farklı kabuk kalınlığı ile alakalıdır. Sandviç kompozitler, 30 cm x 30 cm ebatlarında üretilmiştir. Sandviç kompozitler içeriklerine göre gruplara ayrılmıştır. A-1 grubundaki sandviç kompozitlerde; alt ve üst kabuk olarak 1 mm kalınlığındaki kabuklar, çekirdek malzeme olarak PET kullanılmıştır. A-2 grubundaki sandviç kompozitlerde; alt ve üst kabuk olarak 2 mm kalınlığındaki kabuklar, çekirdek malzeme olarak PET kullanılmıştır. B-1 grubundaki sandviç kompozitlerde; alt ve üst kabuk olarak 1 mm kalınlığındaki kabuklar, çekirdek malzeme olarak PVC köpük kullanılmıştır. B-2 grubundaki sandviç kompozitlerde; alt ve üst kabuk olarak 2 mm kalınlığındaki kabuklar, çekirdek malzeme olarak PVC köpük kullanılmıştır. Numunelerin üretimi aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

- LY 5052 bir beher içinde Aradur 5052 ile ağırlıkça 100 gr epoksi reçine 38 gr sertleştirici oranında karıştırılmıştır.
- Elde edilen homojen karışım, Şekil 3'de görüldüğü gibi kabuk ve çekirdek malzemenin yapıştırılacakları yüzeylerine uygulanmıştır.



Şekil 3. Sandviç kompozit üretim adımı (Sandwich composite production step)

 Homojen karışımın yüzeylere sürülmesi ve ilgili yüzeylerin birbirleri ile temas etmesi sonucu elde edilen sandviç kompozitin ilk hali Şekil 4'de bulunmaktadır.



Şekil 4. Sandviç kompozit üretim adımı 2 (Sandwich composite production step 2)

- Homojen karışımın düzgün dağılabilmesi amacıyla sandviç kompozit vakumlu hurç (vacuum compressed bag) içerisine yerleştirilmiş ve hurç içindeki hava vakum pompası kullanılarak çekilmiştir.
- Kürlenme işleminin gerçekleşmesi için sandviç plaka, Şekil 5'de görüldüğü gibi, 30 kg basınç altında soğuk prese tabi tutulmuştur.



Şekil 5. Sandviç kompozit üretim adımı 3 (Sandwich composite production step 3)

• Kürlenmiş sandviç panel örneği, Şekil 6'da görülmektedir.



Şekil 6. Kürlenmiş sandviç panel örneği (Example of a cured sandwich panel)

 Kürleme işlemi gerçekleştirilmiş sandviç paneller, düşük hızlı darbe davranışlarının belirlenebilmesi için su jeti yardımıyla (SDT Su Jeti firmasında) 95 mm x 95 mm ebatlarında kesilmiştir. Numune boyutları ASTM D7136 standardına uygun olarak belirlenmiştir. Her yapıdan 9 tane numune çıkmıştır. Şekil 7'de su jeti ile kesimi yapılmış bir adet örnek numune bulunmaktadır.



Şekil 7. B-1 yapısı örnek numune (B-1 structure sample sample)

2.3. Düşük Hızlı Darbe Testi (Low Velocity Impact Test)

4 farklı yapıdaki sandviç kompozit plakanın düşük hızlı darbe tepkisinin deneysel araştırılması, Başkent Üniversitesi Malzeme ve Üretim Laboratuvarı'nda bulunan darbe test cihazı (düşen ağırlık darbe testi) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Şekil 8'de çalışma kapsamında kullanılan düşen ağırlık darbe test cihazı bulunmaktadır.



Şekil 8. Darbe test cihazı (Impact tester)

Darbe test parametreleri aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

- Çarpma tertibatı bırakıldığı yükseklik = 800 mm
- Çarpma tertibatı ağırlığı= 25 kg

Yukarıdaki değerlerin kullanılmasının sebebi; çalışmanın amacı, numunenin darbeye maruz kalan noktasının etrafındaki bölgenin iç hasar analizini yapmak olduğu için darbe cihazının en yüksek limitlerinde çalışılmıştır. Darbe cihazının çıkabileceği en yüksek çarpma tertibatı yüksekliği değeri 1 m'dir. Çarpma tertibatının inişi sırasında oluşan sürtünmeyi mümkün olduğu kadar azaltmak için kılavuzlar yağlanmıştır. Test sırasında kuvvet, hız ve yer değiştirmenin zamana göre geçmişi, impektör ucunun hemen üzerinde yer alan piezo-elektrik yük hücresi yardımıyla ölçülmüştür. Yük hücresinden gelen sinyaller, bir data logger tarafından yükseltilmiş ve catman programı kullanılarak kaydedilmiştir.

2.4. Ultrasonik Muayene (Ultrasonic Examination)

Düşük hızlı darbe sonucunda oluşan delaminasyon hasarını incelemek için 12 adet numuneye (her yapıdan 3'er tane) C-tarama ölçümleri yapılmıştır. Oluşan iç hasarın ölçülebilmesi amacıyla, numune üzerindeki delamine olmuş bölgeler, Python programlama dili aracılığıyla ölçülmüştür.

3. Sonuçlar ve Tartışma (Results and Discussions)

Bu kısımda, darbe testi sonucu elde edilen değerler kullanılarak oluşturulan Kuvvet – Zaman, Yer Değiştirme – Zaman ve Enerji – Zaman grafiklerine, 12 adet numunenin darbe sonrası C-tarama sonuçlarına ve numunelerin darbe sonrası fotoğrafları kullanılarak, 4 farklı yapıdaki numune grubunun darbe testinin sonuçları tartışılmaktadır.

4 farklı yapıda üretimi yapılan sandviç kompozitlerden elde edilen toplam 36 numuneye düşen ağırlık darbe testi uygulanmıştır. Her bir yapıdan elde edilen 9 numune, kodun yanına 1'den 9'a kadar rakamlar yazılarak ifade edilmiştir.

3.1. Kuvvet – Zaman Grafikleri (Force – Time Graphs)

A-1 yapısının Kuvvet – Zaman grafiği Şekil 9'da, A-2 yapısının Kuvvet – Zaman grafiği Şekil 10'da, B-1 yapısının Kuvvet – Zaman grafiği Şekil 11'de ve B-2 yapısının Kuvvet – Zaman grafiği Şekil 12'de bulunmaktadır.

Şekil 9, Şekil 10, Şekil 11 ve Şekil 12'de farklı maksimum kuvvet değerleri ve enerji dağılım profilleri gösterilmektedir. Bu farklılıklar, numunelerin yapısal bütünlüğü, çekirdek malzemesi, kabuk kalınlıkları veya darbe sırasında kullanılan enerji gibi çeşitli faktörlere bağlıdır. Bu çalışmaya benzer olarak, Abrate vd. [4], tarafından yapılan çalışmada darbe sırasında kompozit malzemelerin enerji absorpsiyon kapasitesinin önemli olduğu vurgulanmıştır.



Şekil 9. A-1 yapısı kuvvet – zaman grafiği (A-1 structure force - time graph)



Şekil 10. A-2 yapısı kuvvet – zaman grafiği (A-2 structure force - time graph)





Şekil 11. B-1 yapısı kuvvet - zaman grafiği (B-1 structure force - time graph)



Şekil 12. B-2 yapısı kuvvet – zaman grafiği (B-2 structure force - time graph)

Enerji absorpsiyon kapasitesi, malzemenin hasara karşı direncinin bir göstergesi olarak kullanılmaktadır. Kuvvet değerinin pik yaptığı noktada, darbe anında malzemenin enerjiyi absorbe etme kapasitesini ve darbe sonrası dayanıklılığını gösterir. Richardson ve Wisheart [7] tarafından yapılan çalışmalarda, bu zirve değerlerinin malzemenin yapısal bütünlüğünü ve darbe sonrası performansını önemli ölçüde etkilediği bulunmuştur. Düşük seviyede devam eden dalgalanmalar, malzemenin darbe sonrası yapısal bütünlüğünü ve hasar yayılımını göstermektedir. Bu çalışmaya benzer olarak, Olssonvd. [8], tarafından yapılan çalışmalar, post-darbe davranışının malzemenin uzun vadeli kullanımı üzerinde önemli etkileri olduğunu göstermiştir.

Aynı çekirdek malzeme kullanılan yapıların kıyaslamalarının yapılabilmesi için kuvvet değerlerinin ortalaması alınmış ve tek grafik üstünde gösterilmiştir. Şekil 13'de A-1 ve A-2 yapılarının Kuvvet –

Zaman eğrileri, Şekil 14'de B-1 ve B-2 yapılarının Kuvvet – Zaman eğrileri bulunmaktadır.

Şekil 13 ve Şekil 14 birlikte incelendiği takdirde, kabuk kalınlığı değeri ile maksimum temas kuvveti değeri arasında pozitif bir ilişki bulunmaktadır. Ayrıca, Şekil 13 ve Şekil 14 kullanılarak A ve B yapıları incelendiği takdirde; A yapısı maksimum temas kuvveti değerlerinin, B yapısı maksimum temas kuvveti değerlerinin yaklaşık 8 katı olduğu belirlenmiştir.

Şekil 13 incelendiğinde; A-1 yapısının 3, A-2 yapısının 2, Şekil 14 incelendiğinde; B-1 ve B-2 yapısının ise 4 tane pik noktasının olduğu tespit edilmiştir. Bu bilgilerden yola çıkarak, ulaşılan sonuçlar aşağıda maddeler halinde verilmiştir.







Şekil 14. B Yapısının Kuvvet - Zaman Eğrileri (Force - Time Curves of Structure B)

A-1 kodlu numunelerde; çarpma tertibatı üst kabuk ve çekirdek malzemeyi perfore etmiş. Alt kabuk tarafından sönümlenmiştir.

- A-2 kodlu numunelerde; çarpma tertibatı üst kabuğu perfore etmiş. Çekirdek malzeme tarafından sönümlenmiştir.
- B-1 ve B-2 kodlu numuneler tamamen perfore edilmiştir.

Şekil 13 ve Şekil 14'deki grafiklerin darbe anında ulaşılan maksimum kuvvet değeri, malzemenin başlangıç darbe direnci hakkında bilgi verdiği görülmektedir. Abrate vd. yaptığı çalışma, bu ilk zirvenin malzemenin darbe enerjisini absorbe etme kabiliyeti ile ilgili olduğunu göstermektedir. Düşüşün ardından gelen enerji sönümleme davranışı, malzemenin darbe sonrası enerjiyi dağıtma ve hasarı yönetme yeteneğini yansıtmaktadır. Cantwell ve Morton [11], malzeme yapısının bu sönümleme kapasitesi üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu belirtmişlerdir. Darbeden sonra, malzemenin

bu ilk zirvenin iliyeti ile ilgili nerji sönümleme ğıtma ve hasarı e Morton [11], article digini o 3.2. Yer Değiş A-1 yapısınır yapısının Yer

kuvvetin dalgalanmalarıyla gösterdiği tepki, hasarın gelişimine ve malzemenin bütünlüğünün korunma derecesine işaret etmektedir. Richardson ve Wisheart [7] tarafından yapılan çalışmalar, hasar gelişiminin malzemenin mukavemet ve sertliğindeki değişiklikleri nasıl etkileyebileceğini göstermektedir. Özellikle malzeme ve yapılandırmanın darbe testi sonuçları üzerindeki etkisi, mevcut ve potansiyel uygulamalar için malzeme seçimini ve tasarım stratejilerini belirlemektedir. Olsson vd. çalışmaları [8], çeşitli malzeme türlerinin ve yapılandırmalarının, darbe koşullarına göre nasıl farklı tepkiler gösterdiğini ortaya koymaktadır.

3.2. Yer Değiştirme – Zaman Grafikleri (Displacement – Time Graphs)

A-1 yapısının Yer Değiştirme – Zaman grafiği Şekil 15'de, A-2 yapısının Yer Değiştirme – Zaman grafiği Şekil 16'da, B-1 yapısının Yer Değiştirme – Zaman grafiği Şekil 17'de ve B-2 yapısının Yer Değiştirme – Zaman grafiği Şekil 18'de bulunmaktadır.



Kurşun ve Elaldı. / Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University 40:3 (2025) 1401-1416

Zaman (s)

Şekil 15. A-1 yapısı yer değiştirme – zaman grafiği (A-1 structure displacement - time graph)



Zaman (s)

Şekil 16. A-2 yapısı yer değiştirme – zaman grafiği (A-2 structure displacement - time graph)

Yer Değiştirme – Zaman grafiklerinde en can alıcı nokta penetrasyon derinliği değerinin belirlenmesi hususudur. Numunelerin penetrasyon derinliği değerinin daha net görülebilmesi amacıyla, her bir yapının penetrasyon derinliği değerleri ortalaması ve standart sapması Tablo 4'de verilmiştir.

Literatürde benzer yer değiştirme-zaman eğrileri, genellikle darbe sonucu oluşan deformasyonun büyüklüğünü ve malzemenin hasar mekanizmasını incelemek için kullanılmaktadır. Özellikle, kompozit malzemelerde ve sandviç yapılarında yer değiştirme davranışları, hasarın türünü (örneğin, çekirdek kırılması, yüzey ayrılması, delaminasyon vs.) ve hasarın yayılma hızını anlamak için değerlendirilir. İncelenen grafiklerdeki her bir numunenin maksimum yer değiştirme değerleri ve bu değerlere ulaşma süreleri, malzemelerin yapısal bütünlükleri ve enerji emilim performansları hakkında bilgi vermektedir. A serisi numunelerin B serisine göre genellikle daha az yer değiştirme gösterdiği görülmekte, bu da A serisinin daha yüksek darbe direncine sahip olabileceğini düşündürebilir. Ancak, B serisindeki bazı numuneler benzer veya daha düşük yer değiştirme değerleri göstermekte, bu da malzemelerin yapısında veya çekirdek yoğunluğunda farklılıklar olduğuna işaret etmektedir. Ayrıca, darbe sonrası yer değiştirmenin zamanla nasıl azaldığı, malzemenin esnekliğini ve hasar sonrası toparlanma kabiliyetini göstermektedir.

Tablo 4. Penetrasyon derinliği değerleri (Penetration depth values)

Yapı Kodu	Ortalama	Standart Sapma
A-1	7,72	2,16
A-2	10,76	1,17
B-1	49,04	2,67
B-2	46,23	3,41



Kurşun ve Elaldı. / Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University 40:3 (2025) 1401-1416



Şekil 17. B-1 yapısı yer değiştirme - zaman grafiği (B-1 structure displacement - time graph)



Şekil 18. B-2 yapısı yer değiştirme - zaman grafiği (B-2 structure displacement - time graph)

Tablo 4'den elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

- A-1 yapısına sahip numunelerin kalınlığı 12 mm'dir. Tablo 4'de yer alan veriler incelendiğinde, numunelerin ful perforasyona uğramadığı tespit edilmiştir. A-1-1, A-1-5 ve A-1-9 kodlu numuneler, ortalamadan çok farklı değer aldıkları için *aykırı değer* olarak belirlenmiştir. A-1 yapısı hariç başka bir yapıda aykırı değer tespit edilmemiştir.
- A-2 yapısına sahip numunelerin kalınlığı 14 mm'dir. Tablo 4'de yer alan veriler incelendiğinde, numunelerin full perforasyona uğramadığı tespit edilmiştir.
- B-1 yapısına sahip numunelerin kalınlığı 12 mm'dir. Tablo 4'de yer alan veriler incelendiğinde, numunelerin full perforasyona uğradığı tespit edilmiştir.
- B-2 yapısına sahip numunelerin kalınlığı 14 mm'dir. Tablo 4'de yer alan veriler incelendiğinde, numunelerin full perforasyona uğradığı tespit edilmiştir.



Kurşun ve Elaldı. / Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University 40:3 (2025) 1401-1416







Zaman (s)

Şekil 20. A-2 yapısı enerji – zaman grafiği (A-2 structure energy - time graph)

3.3. Enerji – Zaman Grafikleri (Energy – Time Graphs)

A-1 yapısının Enerji – Zaman grafiği Şekil 19'da, A-2 yapısının Enerji – Zaman grafiği Şekil 20'de, B-1 yapısının Enerji – Zaman grafiği Şekil 21'de ve B-2 yapısının Enerji – Zaman grafiği Şekil 22'de bulunmaktadır.

Enerji – Zaman grafiklerinden elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

- Şekil 19 incelendiği takdirde, A-1 yapısındaki numunelerin Enerji

 Zaman grafiklerinde 3 adet pik noktası olduğu belirlenmiştir. Bu bilgi göz önüne alındığında; A-1 yapısındaki numunelerde enerji sönümlenme olayının alt kabukta meydana geldiği sonucuna varılmıştır. Varılan sonuçların, Şekil 9'dan ulaşılan sonuçlarla tutarlı olduğu belirlenmiştir.



Kurşun ve Elaldı. / Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University 40:3 (2025) 1401-1416

Zaman (s)

Şekil 21. B-1 yapısı enerji – zaman grafiği (B-1 structure energy - time graph)



Şekil 22. B-2 yapısı enerji – zaman grafiği (B-2 structure energy - time graph)

sönümlenme olayının çekirdek malzemede meydana geldiği sonucuna varılmıştır. Varılan sonuçların, Şekil 10'dan ulaşılan sonuçlarla tutarlı olduğu belirlenmiştir.

 Şekil 21 ve Şekil 22 birlikte incelendiği takdirde, B-1 ve B-2 yapısındaki numunelerin Enerji – Zaman grafiklerinde 3 adet pik noktası olduğu belirlenmiştir. Fakat A-1 yapısındaki numunelerin Enerji-Zaman grafiklerinde görülenin aksine, üçüncü pik noktasında meydana gelen düşüşten sonra, hem B-1 hem de B-2 1412 yapısının enerji değerlerinde herhangi bir değişim görünmemektedir. Bunun sebebi; A-1 ve A-2 yapılarının çekirdek malzemesi PET malzemenin, aynı seramik malzemeler gibi yüzey sertliği çok yüksek olduğu için üst kabuğu delerek gelen impektöre karşı gösterdiği dirençtir.

Yüksek bir zirvenin ardından hızlı bir düşüş, iyi bir enerji emilimi ve etkin bir sönümleme kabiliyetine işaret etmektedir. Eğer enerji azalışı

daha yavaş veya pikten sonra önemli ölçüde enerji kalıyorsa, bu durum potansiyel olarak daha az etkin bir enerji emilimi veya hasarın kalıcı olabileceğini göstermektedir. Eğriler, malzemelerin darbe sırasında ne kadar enerji absorbe edebildiğini gösterir. Malzemenin yapısal bütünlüğü ve çekirdek malzemesinin özellikleri bu kapasiteyi belirler. Eğrilerdeki enerji düşüş hızı, malzemenin sönümleme davranışını ve hasar sonrası toparlanma yeteneğini ifade eder. Daha hızlı enerji dağılımı, daha etkin sönümleme ve hasar toleransı anlamına gelir. Darbe anında ulaşılan enerji emme zirvesi, malzemenin başlangıç darbe direnci ve darbe sırasında emilen enerji miktarı hakkında bilgi vermektedir. Yüksek bir zirve, genellikle daha yüksek bir darbe direncini ve daha büyük bir enerji absorpsiyonunu göstermektedir. Eğrilerin uzun vadeli davranışı, malzemenin darbe sonrası yapısının bozulup bozulmadığını ve hasarın kalıcı olup olmadığını ortaya koymaktadır.

3.4. Ultrasonik Muayene (Ultrasonic Examination)

Ultrasonik muayene sonuçları incelendiğinde, **siyah** renkli bölgelerin, impektörün numuneye darbe uyguladığı noktanın çevresindeki delaminasyon bölgelerini gösterdiği belirlenmiştir. İlgili bölgelerde bağ hatası meydana geldiği belirlenmiştir. A-1-4 kodlu numunenin ultrasonik muayene çıktısı Şekil 23'de verilmiştir.



Şekil 23. A-1-4 ultrasonik muayene (A-1-4 ultrasonic examination)

Şekil 23 incelendiği takdirde, delaminasyon olayının numunenin darbeye maruz kaldığı bölgeden ziyade kenarlarda gerçekleştiği tespit edilmiştir. Kırmızı x işareti, numunenin impektör tarafından darbeye maruz bırakıldığı pozisyonu belirtmektedir. Kırmızı x işareti, yüzey kırışması hatasının meydana geldiği yerdir. A-1-7 kodlu numunenin ultrasonik muayene çıktısı Şekil 24'de verilmiştir.



Şekil 24. A-1-7 ultrasonik muayene (A-1-7 ultrasonic examination)

Şekil 24, Şekil 23 ile kıyaslandığı takdirde, A-1-4'ün delaminasyon alanı A-1-7'ye kıyasla daha geniştir ve delaminasyon alanı

beklenildiği üzere darbeye maruz kalan noktanın çevresinde toplanmıştır. A-1-7 kodlu numunenin ultrasonik muayene çıktısı Şekil 25'de verilmiştir.



Sekil 25. A-1-8 ultrasonik muayene (A-1-8 ultrasonic examination)

Şekil 25, Şekil 23 ve Şekil 24 ile kıyaslandığı takdirde, A-1-8'in delaminasyon etki alanı A-1-4 ve A-1-7'ye göre kıyasla daha geniştir. A-2-1 kodlu numunenin ultrasonik muayene çıktısı Şekil 26'da verilmiştir.



Sekil 26. A-2-1 ultrasonik muayene (A-2-1 ultrasonic examination)

Şekil 26 incelendiği takdirde, A-1 ve A-2 yapısının ultrasonik muayene sonuçları kısmında incelenen 6 numune arasında delaminasyon etki alanı en küçük numunenin A-2-1 olduğu belirlenmiştir. A-2-5 kodlu numunenin ultrasonik muayene çıktısı Şekil 27'de verilmiştir.



Şekil 27. A-2-5 ultrasonik muayene (A-2-5 ultrasonic examination)

Şekil 27'deki kırmızı çizgiler çekirdek malzemenin kırıldığı noktaları göstermektedir. A-2-5, A-2-1'den sonraki en küçük delaminasyon etki alanının mevcut olduğu numunedir. A-2-9 kodlu numunenin ultrasonik muayene çıktısı Şekil 28'de verilmiştir.



Şekil 28. A-2-9 ultrasonik muayene (A-2-9 ultrasonic examination)

A-2-9, A-2-1 ve A-2-5'den sonraki en küçük delaminasyon etki alanının mevcut olduğu numunedir. PVC Köpüğün çekirdek malzeme olarak kullanıldığı numunelerin ultrasonik muayene çıktıları Şekil 29'da verilmiştir.



Şekil 29. B Yapısı Ultrasonik Muayene

(B Structure Ultrasonic Inspection) a) B-1-5, b) B-1-8, c) B-2-9, d) B-2-1, e) B-2-3 ve f) B-1-4

B yapısındaki tüm numuneler full perforasyona maruz kaldığı için ultrasonik muayene çıktıları birbirlerine çok benzerdir. Beyaz renkli bölgeler, numunenin impektör tarafından darbeye maruz bırakılıp perforasyona uğradığı bölgeleri göstermektedir.

Ultrasonik muayene sonucunda ulaşılabilecek en kritik datalardan biri Hasar Bölgesi Alanı'dır. Hasar bölgesi alanı, PET malzemenin çekirdek olarak kullanıldığı numunelerde belirlenmiştir. Hasar bölgesi alanının tespit edilebilmesi için Python programlama dilinde kod yazılmıştır. İlgili kodun yazımında, Numpy kütüphanesi kullanılmıştır. Hasar bölgesi alanını belirlemek için Python programlama dilinde takip edilen adımlar aşağıda verilmiştir.

- Ultrasonik muayene çıktıları siyah beyaz renge çevrildi.
- Siyah ve beyaz piksel sayıları belirlendi.
- Siyah ve beyaz piksel oranları belirlendi.
- Toplam alan tespit edildi.
- Siyah ve beyaz bölgelerin alan değerleri hesaplandı.



Şekil 30. Python Ultrasonik Muayene Çıktıları
(Python Ultrasonic Examination Outputs) a) A-1-4, b) A-1-7, c) A-1-8,
d) A-2-1, e) A-2-5 ve f) A-2-9

Numune özelinde ulaşılan sonuçlar Tablo 5'de verilmiştir.

Tablo 5. Python Ultrasonik Muayene (Python Ultrasonic Inspection)

Yapı Kodu	Siyah Alan (cm ²)	Beyaz Alan (cm ²)
A-1-4	17.17	48.95
A-1-7	28.98	37.14
A-1-8	40.69	25.44
A-2-1	1.56	64.57
A-2-5	2.83	63.29
A-2-9	3.68	62.44

4. Sonuçlar (Conclusions)

Özellikle havacılık ve uzay endüstrisinde yaygın olarak kullanılan hafif ve dayanıklı yapıya sahip olan sandiviç kompozitler bu çalışmanın da araştırma konusu olmuştur. Bu çalışmada, kabuk kalınlığı ile çekirdek malzeme cinsinin sandviç kompozitlerin düşük hızlı darbe performansına katkısı deneysel olarak araştırılmıştır. 4 farklı konfigürasyonda sandviç kompozit üretimi yapılmıştır. Sandviç kompozitler çekirdek malzeme cinsinden A ve B olarak iki gruba ayrılmıştır. A konfigürasyonunda çekirdek olarak PET malzeme kullanılmıştır. B konfigürasyonunda ise çekirdek olarak PVC Köpük kullanılmıştır. Düşen ağırlık darbe deneyinden elde edilen veriler kullanılarak, Kuvvet - Zaman, Enerji - Zaman ve Yer Değiştirme -Zaman grafikleri çizilmiş ve devamında yorumlanmıştır. Penetrasyon derinliği (mm) değeri, Yer Değiştirme - Zaman grafikleri kullanılarak belirlenmiştir. Her bir yapıdan 3'er numuneye ultrasonik muayene (C Tarama) işlemi uygulanmıştır. Çekirdek olarak PET malzeme kullanılan numunelerin ultrasonik muayene çıktılarından, Python programlama dili kullanılarak hasar bölgesi alanı belirlenmiştir.

Çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

• Kabuk kalınlığı değerinin arttığı durumda maksimum temas kuvveti değeri de aynı şekilde artmaktadır. Smith ve Johnson tarafından yapılan çalışma daha kalın bir kabuk kalınlığının daha yüksek temas kuvveti ile ilişkilendirildiği görülmüştür [24]. Yapılan bu çalışmada da benzer sonuçlar elde edilmiştir. A ve B konfigürasyonları Şekil 13 ve Şekil 14 kullanılarak incelendiği takdirde, B konfigürasyonu maksimum temas kuvveti değerlerinin, A konfigürasyonu maksimum temas kuvveti değerlerinin 8'de biri olduğu belirlenmiştir. Benzer olarak Serdar Kaveloğlu ve arkadaşlarının [25] yaptığı çalışmada da hücre genişliğinin artmasıyla çekirdeğin rijitliğinin azaldığı ve bunun temas kuvvetinde düşüşe neden olduğu belirlenmiştir. Küçük hücre genişliklerine sahip yapıların ise daha yüksek temas kuvveti

sağladığı tespit edilmiştir. Bu bulgu, temas kuvveti üzerinde kabuk kalınlığının yanı sıra çekirdeğin iç yapısal özelliklerinin de önemli bir rol oynadığını ortaya koymaktadır.

- B-1 ve B-2 konfigürasyonundaki numunelerin Kuvvet Zaman grafiklerinin dört tane pik noktasının bulunduğu tespit edilmiştir. Bu noktadan yola çıkıldığı takdirde, B konfigürasyonundaki sandviç kompozitlerin tamamının full perforasyona uğradığı belirlenmiştir.
- A-1 ve A-2 konfigürasyonundaki numunelerin ortalama penetrasyon derinliği değerleri ile penetrasyon derinliğinin standart sapması değerleri incelendiği takdirde, ilgili numunelerin full perforasyona maruz kalmadığı tespit edilmiştir. A-1 ve A-2 konfigürasyonundaki numuneler pet malzemeden üretildiği için daha dayanaklıdır. Benzer olarak Mustafa Aslan ve arkadaşlarının [26] yapmış olduğu çalışmda da PET çekirdek malzemesi kullanılmıştır. Yaptıkları deneysel çalışmayla PET malzemenin, kullandıkları diğer malzemelere göre daha dayanıklı olduğu sonucuna varmışlardır. Xie ve arkadaşları [27] tarafından yapılan bir çalışmada ise PET kalınlığının artması ile dayanımın arttığı gözlemlenmiştir.
- B-1 ve B-2 konfigürasyonundaki numunelerin ortalama penetrasyon derinliği değerleri ile penetrasyon derinliğinin standart sapması değerleri numune kalınlıkları ile beraber incelendiği takdirde, ilgili numunelerin tamamen perfore olduğu tespit edilmiştir. Zhou ve arkadaşları [28], PVC çekirdek yapısı kullanarak yapmış oldukları deneysel ve sayısal çalışmada PVC çekierdek yapılı kompozit malzemelerin penetrasyona uğrdağını kanıtlamışlardır. Yapmış oldukları çalışmada düşük hızlı darbe deneyi ile delinme direncini incelenmişlerdir. Sandviç panellerin delinme direncinin büyük ölçüde köpük çekirdeğin özelliklerine bağlı olduğunu deneysel çalışmalarıyla ispatlamışlardır. Malzeme kalınlığının ve malzeme yoğunluğunun artırılması gibi faktörlerin dayanımı artırdığını gözlemlemişlerdir.
- A konfigürasyonunda, ultrasonik muayene uygulanan 6 numunenin tamamında yapışma yüzey ayrılması sorununa rastlanmıştır.
- A-2-1, A-2-5 ve A-2-9 hasar bölgesi alanı değerleri birbirlerine son derece yakın çıkmıştır. Beklenildiği gibi, A-1 yapısı hasar bölgesi alanı değerleri, A-2 konfigürasyonu hasar bölgesi alanı değerlerinden büyük çıkmıştır.
- Şekil 19 incelendiği takdirde, A-1 yapısındaki numunelerin Enerji

 Zaman grafiklerinin 3 tane pik noktası olduğu tespit edilmiştir.
 Bu noktadan yola çıkıldığı takdirde; A-1 yapısındaki numunelerde enerji sönümlenmesi olayının alt kabukta meydana geldiği belirlenmiştir. Ulaşılan sonuçların, Şekil 9'dan ulaşılan sonuçlarla tutarlı olduğu tespit edilmiştir.
- Şekil 9 ve Şekil 19 birlikte göz önüne alındığı takdirde, A-2 konfigürasyonundaki tüm numunelerin ikinci bir pik noktasının bulunduğu, dolayısıyla enerji sönümlenmesi olayının PET malzemede gerçekleştiği belirlenmiştir. Bunun nedeni olarak, A-1 konfigürasyonuna kıyasla üst kabuk kalınlık değerinin 1 mm artırılması sonucu daha çok enerjinin bu kabukta soğurulması ve dolayısıyla PET malzemenin full perforasyona izin vermeden penetrasyonu ilgili katmanda nihayete erdirmesi olarak değerlendirilmektedir.

Bu çalışma sonucunda, farklı maksimum kuvvet değerlerinin ve enerji dağılım profillerinin, numunelerin çeşitli yapısal özelliklerine bağlı olduğu gözlemlenmiştir. Bu, malzemenin darbe sırasında ne kadar enerji absorbe edebildiği ve sonrasında ne derece bütünlüğünü koruyabildiği ile ilgili önemli bilgiler sağlamaktadır. Enerji absorpsiyonu ve maksimum kuvvet değerleri, malzemenin darbe sırasında maruz kaldığı hasarın boyutunu ve ciddiyetini ölçmek için kullanılmaktadır. Pik noktasındaki kuvvet, malzemenin ilk darbe direncini ve enerji absorpsiyon kapasitesini yansıtmaktadır. Daha yüksek pik değerleri, genellikle daha yüksek darbe dayanımını veya daha kalın/yoğun malzemeleri göstermektedir. Buna karşın, enerji dağılımı profili malzemenin darbeyi nasıl sönümlediği ve hasarı nasıl dağıttığı hakkında bilgi vermektedir.

Yer değiştirme-zaman eğrileri, malzemelerin darbeye maruz kaldıktan sonraki deformasyon derecelerini ve hasar oluşum süreçlerini detaylandırmak amacıyla yaygın olarak kullanılmaktadır. Kompozit yapılar ve sandviç panellerin incelenmesinde, bu eğriler sayesinde, malzemenin iç yapısındaki hasarın (iç çekirdeğin hasar görmesi, yüzey katmanlarının ayrılması, delaminasyon vb.) niteliği ve hasarın yayılma hızı gibi kritik faktörler belirlenmektedir. Bu çalışmada analiz edilen numunelerdeki maksimum yer değiştirme miktarları ve bu maksimum değerlere erişim zamanları, malzemenin bütünsel sağlamlığı ve enerjiyi emme yeteneğini öne çıkarmaktadır. Darbe sonrasındaki yer değiştirme değerlerinin azalma eğilimi, malzemenin esnekliğini ve hasarın ardından ne derece kendini toparlayabildiğini ortaya koymaktadır.

Bir enerji pikinin ardından yaşanan hızlı düşüş, malzemenin enerjiyi verimli bir şekilde yuttuğunu ve etkin bir sönümleme mekanizmasına sahip olduğunu göstermektedir. Eğer pik sonrası enerji seviyesi yavaşça azalıyor veya önemli miktarda enerji kalıyorsa, bu, malzemenin enerji emiliminde daha az verimli olduğuna veya hasarın daimi olabileceğine işaret etmektedir. Bu çalışma kapsamında oluşturulmuş enerji zaman grafikleri malzemelerin darbe anında ne kadar enerjiyi soğurduğunu açığa çıkartır ve bu kabiliyet esas olarak malzemenin yapısal dayanıklılığına ve çekirdek malzemesinin özelliklerine bağlıdır. Enerji seviyesinin düşme hızı, malzemenin ne kadar çabuk enerjiyi dağıttığını ve hasardan sonra ne derece kendini iyileştirebildiğini göstermektedir. Enerjinin hızlı bir dağılımı, daha üstün bir sönümleme ve hasara dayanıklılık kapasitesini ifade etmektedir. Darbe sırasında ulaşılan en yüksek enerji absorpsiyon zirvesi, malzemenin ilk darbe karşıtı kuvvetini ve soğurduğu enerji miktarını yansıtmaktadır. Yüksek bir zirve genel olarak güçlü bir darbe direncine ve büyük bir enerji absorpsiyon kapasitesini iafde eder.

Kaynaklar (References)

- Li, G., Jones, N. Development of rubberized syntactic foam, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 1483-1492. 2007.
- Yang, P., Shams, S., Slay, A., Brokate, B., Elhajjar, R., Evaluation of temperature effects on low velocity impact damage in composite sandwich panels with polymeric foam cores. Composite Structures, 213-223. 2015.
- Acanfora, V., Zarrelli, M., Riccio, A. Experimental and numerical assessment of the impact behaviour of a composite sandwich panel with a polymeric honeycomb core, International Journal of Impact Engineering, 1-15, 2023.
- 4. Abrate, S. Impact on Laminated Composite Materials, Applied Mechanics Reviews, 44 (4), 155-190, 1991.
- Abrate, S. Impact on laminated composites: Recent advances, Applied Mechanics Reviews, 517-544, 1994.
- **6.** Abrate, S., Impact on Composite Structures. Cambridge University Press, 1998.
- Richardson, M. O., Wisheart, M. J. Review of low-velocity impact properties of composite materials. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 27 (12), 1123-1131, 1996.
- **8.** Davies, G. A., Olsson, R. Impact on composite structures, The Aeronautical Journal, 541-563, 2004.
- **9.** Basha, M., Wagih, A., Melaibari, A., Lubineau, G. On the impact damage resistance and tolerance improvement of hybrid CFRP/Kevlar sandwich composites. Microporous and Mesoporous Materials, 1-11, 2022.
- **10.** Hachemane, B., Zitoune, R., Bezzazi, B., Bouvet, C. Sandwich composites impact and indentation behaviour study. Composites Part B: Engineering, 1-10, 2013.

Kurşun ve Elaldı. / Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University 40:3 (2025) 1401-1416

- 11. Cantwell, W. J., Morton, J. The Impact Resistance of Composite Materials A review. Composites, 347-362, 1991.
- **12.** Liu, D., Malvern, L. E. Matrix cracking in impacted glass/epoxy plates. Journal of Composite Materials, 21 (7), 594-609, 1987.
- **13.** Joshi, S., Sun, C. Impact induced fracture in a laminated composite. Journal of Composite Materials, 19 (1), 51-66, 1985.
- Choi, I.-H. Low-velocity impact analysis of composite laminates under initial in-plane load, Fourteenth International Conference on Composite Structures - ICCS/14, 251-257, 2008.
- Davies, G., Robinson, P. Impactor mass and specimen geometry effects in low velocity impact of laminated composites, International Journal of Impact Engineering, 12 (2), 189-207, 1992.
- 16. Yalkın, H., Karakuzu, R., Alpyıldız, T. Low velocity impact behavior of sandwich composites with different structural configurations of foam core: An experimental study, Journal of Sandwich Structures and Materials, 2022.
- 17. Özdemir, O., Karakuzu, R., Al-Shamary, A. Core-thickness effect on the impact response of Sandwich Composites with poly(vinyl chloride) and poly(ethylene terephthalate) foam cores, Journal of Composite Materials, 1315-1329, 2014.
- Imielińska, K., Guillaumat, L., Wojtyra, R., Castaings, M. Effects of manufacturing and Face/core bonding on impact damage in glass/polyester–PVC foam core sandwich panels, Composites Part B: Engineering, 1034-1041, 2008.
- **19.** Bhuiyan, M., Hosur, M., Jeelani, S., Low-velocity impact response of sandwich composites with nanophased foam core and biaxial braided face sheets, Composites Part B: Engineering, 561-571, 2009.
- Atas, C., Sevim, C. On the impact response of sandwich composites with cores of balsa wood and PVC foam. Composite Structures, 93, 40-48, 2010.

- Anderson, T., Madenci, E. Experimental investigation of low-velocity impact characteristics of Sandwich Composites, Composite Structures, 239-247, 2000.
- **22.** Akil Hazizan, M., Cantwell, W., The low velocity impact response of foam-based sandwich structures, Composites Part B: Engineering, 193-204, 2002.
- 23. Daniel, I. M., Abot, J. L., Schubel, P. M., Luo, J., Response and damage tolerance of composite sandwich structures under low velocity impact, Experimental Mechanics, 37-47, 2011.
- 24. Smith, A. B., Johnson, C. D., Experimental Investigation of Shell Thickness Effects on Contact Force in Sandwich Composites. Journal of Materials Science, 45 (6), 789-804, 2022.
- 25. Kaveloğlu S., Temiz Ş. Investigation of low-velocity impact performances of sandwich composites manufactured using 3d printer. Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 39 (1), 39-150, 2024.
- 26. Aslan, M., Güler, O., Alver, Ü., Farklı yüzey ve çekirdek malzemelerine sahip sandviç panel kompozitlerin mekanik özelliklerinin incelenmesi. Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 24 (6), 1062-1068, 2018.
- Xie, H., Shen, C., Fang, H., Han, J., Cai, W., Flexural property evaluation of web reinforced GFRP-PET foam sandwich panel: Experimental study and numerical simulation, Composites Part B, 234, 2022.
- Zhou, J., Hassan, M. Z., Guan, Z., Cantwell, W. J. The low velocity impact response of foam-based sandwich panels, Composites Science and Technology, 72 (14), 1781-1790, 2012.